

## UJI PERFORMANSI ENSEMBLE KALMAN FILTER UNTUK MENGURANGI NOISE PENGUKURAN SENSOR PADA ROBOT

Barlian Henryranu Prasetio<sup>1</sup>, Wijaya Kurniawan<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup> Computer Engineering and Robotics Lab, Faculty of Computer Science, University of Brawijaya  
Email: <sup>1</sup>barlian@ub.ac.id, <sup>2</sup>wjaykurnia@ub.ac.id

(Naskah masuk: 11 Juni 2015, diterima untuk diterbitkan: 22 Juli 2015)

### Abstrak

Dalam penelitian ini diimplementasikan sebuah teknik robot bergerak yang berkaitan dengan kesetimbangan pada media tidak stabil. Tujuannya adalah merancang dan mengimplementasikan sebuah sistem control diskrit digital yang memberikan stabilitas yang diperlukan. Kontrol PID dan Algoritma filter Kalman menjadi implementasi pengujian ideal model robot ini. Kedua algoritma tersebut mampu meningkatkan performa control pada sistem. Penelitian ini menguji kinerja sistem control PID dan Algoritma filter Kalman. Uji software dilakukan untuk mengumpulkan hasil kinerja kedua Algoritma kontroler PID dan Filter Kalman. Kinerja sistem kontrol secara langsung tergantung pada Algoritma filter Kalman dan parameter masukan controller PID. Penelitian ini menggunakan EnKF dan PID controller sebagai algoritma penyeimbang robot. Dilakukan tuning manual pada kovarian filter. Percobaan dilakukan dengan metode trial and error dengan mengubah-ubah matrik kovarian noise proses. Overshoot sistem bisa dikurangi dengan cara mengatur matrik kovarian noise proses. Dari hasil percobaan sistem optimal pada  $Q_{\text{accelerometer}} : 0.001$ ,  $Q_{\text{gyroscope}} : 0.05$ ,  $R_{\text{pengukuran}} : 0.03$ ,  $P = 1790.005$ ,  $I = 0.129$  dan  $D = 96.881$ .

**Kata kunci:** Ensemble Kalman, Kontroler PID, Performansi, Robot

### Abstract

*One technique that is commonly used for mobile robots is an inverted pendulum based model. This research has been implementing a mobile robot technique in an unstable environment. The goal is to design and implementing a discrete digital control system that will provide robot stability. The PID controller algorithm and Ensemble Kalman filter (EnKF) implementation would be an ideal test model of this robot. Both of these algorithms are able to improve the performance of control systems. This robot already tested the performance of the PID control system and the EnKF algorithm. The performance of the PID controller algorithm and EnKF is tested by software. The Control system performance is directly dependent on the EnKF algorithm and input parameters of PID controller. Research uses EnKF algorithm and PID controller as a balancing robot. The covariance filter tuned by manually. Experiments carried out by the method of trial and error by varying the process noise covariance matrix. The system overshoot can be reduced by processing noise covariance matrix. The experiment results showed system optimal on  $Q_{\text{accelerometer}}: 0.001$ ,  $Q_{\text{gyroscope}}: 0.05$   $R_{\text{measurement}}: 12:03$ ,  $P = 1790.005$ ,  $I = 0.129$  and  $D = 96.881$ .*

**Keywords:** Ensemble Kalman, Kontroler PID, Performance, Robots

## 1. PENDAHULUAN

Robot setimbang merupakan model implementasi dari permasalahan algoritma pendulum terbalik. Algoritma kontrol digital merupakan objek penelitian robot setimbang adalah controller PID. Selama beberapa tahun ini, mikrocontroller menjadi merupakan piranti elektronik yang cepat dan murah. Mikrocontroller menjadi pihan dalam imementasi filter dan sistem kontrol digital. Kedua algoritma ini akan diubah menjadi suatu bahasa pemrograman tinggi seperti C. Kinerja algoritma akan diuji dalam implementasi robot. Algoritma controller PID akan digunakan untuk menjaga kestabilan robot. Selain itu, sistem kontrol akan diberikan tambahan suatu algoritma filter Kalman. Filter merupakan suatu algoritma estimasi yang umum digunakan dalam

embedded sistem. Filter ini digunakan untuk memadukan sensor accelerometer dan gyro. Data sensor digunakan untuk mendapatkan informasi kemiringan pada robot.

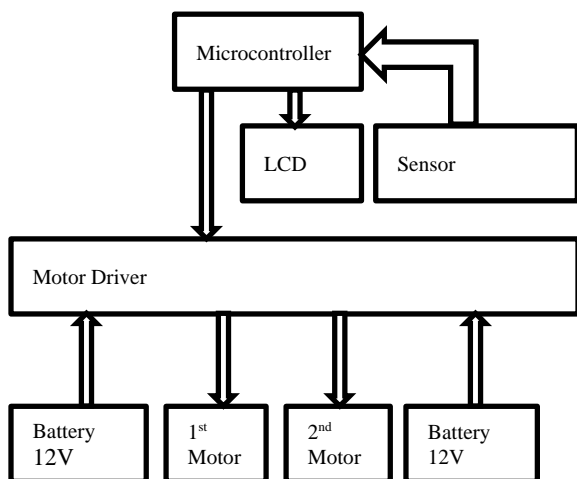
Filter kalman mempunyai kelebihan dapat digunakan untuk estimasi keadaan sistem dinamik (Kleinbaurer, 2004) serta data yang sedikit (Masduki, 2008) khususnya dalam sistem yang linier (Hasbullah, 2011). Pengembangan filter kalman untuk dapat menafsirkan keadaan nonlinier salah satunya adalah unscented kalmna filter (UKF). Berdasarkan penelitian Rudi (2007) dan Baehaqi (2009) UKF menunjukkan, filter lebih akurat dibandingkan extended (EKF) dan ensemble (EnKF) namun membutuhkan waktu komputasi yang lebih lama. Pada dasarnya, memiliki akurasi dan waktu komputasi yang sebanding (Rolf. H, 2002) tetapi EKF cocok digunakan untuk single accelerometer dan

image processing (Hyunuk Ha, 2010) sedangkan EnKF dapat membangkitkan sejumlah ensemble sebagai inisialisasi perhitungan mean dan kovarian error nonlinier sehingga EnKF dapat digunakan pada sistem dinamik robot dengan pendulum terbalik tanpa harus melakukan pelinieran terlebih dahulu (Dharmawan. A, 2012). Dalam implementasinya, penelitian ini membutuhkan algoritma yang cepat tetapi tidak perlu terlalu akurat. Sehingga pada penelitian ini digunakan algoritma EnKF.

Penelitian ini merupakan penelitian implementatif dari hasil ujicoba. Konsep, metode dan langkah implementasi merupakan hasil dari beberapa referensi. Penelitian ini bukan merupakan hal baru dalam penelitian-penelitian dalam dunia robotika. Namun dalam penelitian ini mengimplementasikan sebuah robot setimbang yang mampu ditumpangi manusia sebagai alternatif alat transportasi darat. Robot jenis ini telah banyak beredar secara komersil dengan nama robot Segway. Namun penelitian ini memberikan sebuah desain dan komputasi sederhana dalam robot tanpa merubah esensinya.

## 2. STRUKTUR ROBOT

Robot setimbang dengan roda dua merupakan bagian dari kebutuhan utama penelitian ini. Sebuah mikrokontroler, motor DC, dan sensor inersia akan digunakan untuk memenuhi tujuan menyeimbangkan robot roda dua. Blok diagram desain struktur robot dapat dilihat pada gambar 1.



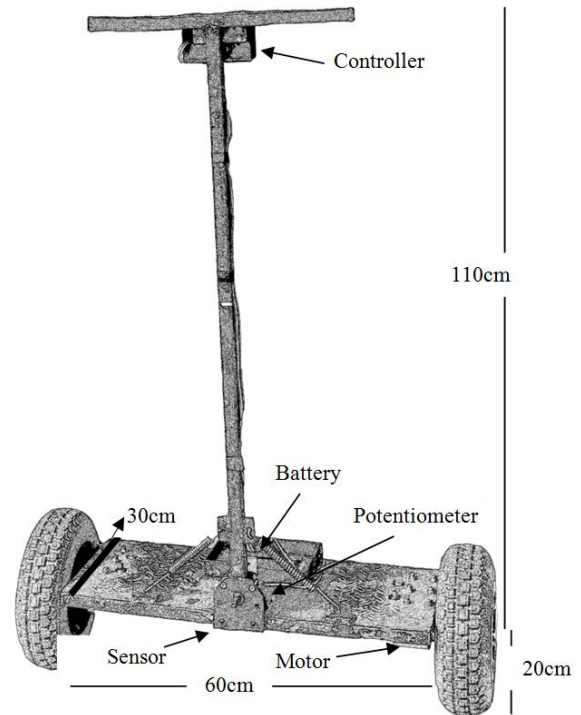
Gambar 1. Blok Diagram Desain Struktur Robot

Sensor yang digunakan dalam implementasi robot setimbang dua roda adalah sensor gyroscope dan accelerometer. Sensor yang digunakan adalah sensor IMU digital combo board 6 degrees freedom ITG 3200/ADXL 345. Kedua buah sensor tersebut akan memberikan data sudut kemiringan robot.

Motor adalah bagian yang digunakan dalam pergerakan robot dalam mencapai kesetimbangan. Pemilihan Motor DC yang baik sangatlah penting. Motor DC dengan torsi yang tinggi dan mempunyai

putaran yang cepat membuat sistem robot roda dua ideal. Motor DC yang digunakan dalam robot ini adalah Jazzy 12V.

Robot ini menggunakan arduino nano. Mikrokontroler ini mempunyai basis ATmega 328 untuk arduino nano 3x dan ATmega 168 untuk arduino nano 2x. Dimensi fisik robot ditunjukkan pada gambar 2.



Gambar 2. Dimensi Fisik Robot

## 3. METODE PENELITIAN

### 3.1. Ensemble Kalman Filter (EnKF)

Sebelum filter Kalman dapat digunakan untuk menghilangkan noise dari sensor, proses atau sistem yang sedang diukur harus dimodelkan secara sistem linear. Sistem linear sistem dapat digambarkan oleh dua persamaan sebagai berikut:

$$x_k = Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w_{k-1} \quad (1)$$

$$z_k = Hx_k + v_k \quad (2)$$

Dimana:

$A, B, H$  adalah state matrix

$w_{k-1}$  adalah noise proses

$k$  adalah indeks waktu

$x_{k-1}$  adalah state proses

$u_{k-1}$  adalah input yang tidak diketahui masuk ke proses

$z_k$  adalah keluaran pengukuran proses

$v_k$  adalah noise pengukuran

Data sensor untuk sistem diambil dari titik sample waktu diskrit. Tidak ada hubungan antara pengukuran noise ( $v_k$ ) dan noise proses ( $w_{k-1}$ ),

karena terdapat variable noise acak bebas. Noise proses dan noise pengukuran dapat digambarkan dengan matrik kovarian  $Q_w$  dan  $R_v$ .

$$Q_w = E[w_k w_k^T] \quad (3)$$

$$R_v = E[v_k v_k^T] \quad (4)$$

Dimana:

$T$  adalah matrix transpose

$E$  adalah perkiraan keluaran yang diharapkan

$Q_w$  adalah kovarian noise proses

$R_v$  adalah kovarian noise pengukuran

Model proses sederhana menggunakan data input gyroscope dapat dimodelkan sebagai berikut:

$$\begin{bmatrix} \theta \\ \theta^* \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} 1 & -dt \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta \\ \theta^* \end{bmatrix}_{k-1} + \begin{bmatrix} dt \\ 0 \end{bmatrix} u_k \quad (5)$$

Dimana:

$\theta$  adalah sudut hasil pengukuran sensor gyro

### 3.2. Kontroler PID

Controller PID merupakan gabungan dari controller Proporsional, Integral dan Derivatif. Sistem kontrol PID dalam domain waktu dinyatakan sebagai berikut:

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt + K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (6)$$

Dimana:

$m(t)$  adalah keluaran kontroler

$K_p$  adalah konstanta proporsional

$K_i$  adalah konstanta integral

$K_d$  adalah konstanta derivatif

Untuk melakukan tuning pada sistem ini, diperlukan pengetahuan tentang pengaruh parameter kontroler PID terhadap parameter pada respon transien dan mantap sistem yang akan dikontrol. Pengetahuan tersebut dapat dilihat dari persamaan matematis yang ada pada kontroler PID (Gunterus, 1994).

Sifat dari parameter PID tersebut adalah:

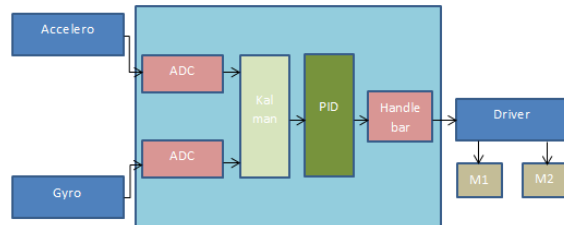
Parameter P: berpengaruh terhadap keadaan transien (settling time= $T_s$ ) dan mantap (error steady state= $E_{ss}$ ).

Parameter I: memperbaiki keadaan mantap (error steady state= $E_{ss}$ ) tapi biasanya memperburuk keadaan transien (timbul overshoot= $M_p$ ).

Parameter D: memperbaiki keadaan transien dari sistem (time settling= $T_s$ , overshoot= $M_p$ ) tapi tidak berpengaruh sama sekali terhadap keadaan mantap dari sistem.

## 4. HASIL DAN PEMBAHASAN

Tujuan utama penggunaan EnKF adalah menghilangkan noise pengukuran dari sensor accelerometer. EnKF juga membantu mengurangi penyimpangan pengukuran dari sensor gyro. Gambar 3 menunjukkan blok diagram sistem.



Gambar 3. Blok Diagram Sistem

Algoritma filter kalman akan memberikan perkiraan sudut kemiringan robot yang lebih baik. Agar filter dapat bekerja dengan baik dibutuhkan tuning manual. Parameter tuning yang perlu di setting adalah matrik kovarian  $Q_w$  dan  $R_v$ . Matrik  $Q_w$  berasal dari noise proses sedangkan  $R_v$  adalah noise pengukuran. Matrik  $Q_w$  dan  $R_v$  dituliskan sebagai berikut:

$$Q = \begin{bmatrix} Q_{\text{accelerometer}} & 0 \\ 0 & Q_{\text{gyroscope}} \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$R = [R_{\text{pengukuran}}] \quad (8)$$

Dimana:

$Q$  adalah matrix kovarian

$R$  adalah matrix pengukuran

Dalam implementasi software, dibuat program dimana controller dapat bekerja dengan baik. Dalam controller digunakan 2 algoritma sistem yaitu filter kalman dan controller PID. Code untuk filter kalman adalah sebagai berikut:

```

double Q_angle = 0.001;
double Q_gyro = 0.050;
double R_angle = 0.03;

double x_angle = 0;
double x_bias = 0;
double P_00 = 0, P_01 = 0, P_10 = 0, P_11 = 0;
double dt, y, S;
double K_0, K_1;

double kalmanCalculate(double newAngle,
double newRate, int looptime) {
dt = double(looptime)/1000;

x_angle += dt * (newRate - x_bias);
P_00 += - dt * (P_10 + P_01) + Q_angle * dt;
P_01 += - dt * P_11;
P_10 += - dt * P_11;
P_11 += + Q_gyro * dt;

y = newAngle - x_angle;
S = P_00 + R_angle;
  
```

```

K_0 = P_00 / S;
K_1 = P_10 / S;

x_angle += K_0 * y;
x_bias += K_1 * y;
P_00 -= K_0 * P_00;
P_01 -= K_0 * P_01;
P_10 -= K_1 * P_00;
P_11 -= K_1 * P_01;

return x_angle;
}

```

Sedangkan controller PID adalah sebagai berikut:

```

#define    GUARD_GAIN    10.0

double K = 1.5 ;
double Kp;
double Ki;
double Kd;
int last_error = 0;
int integrated_error = 0;
int pTerm = 0, iTerm = 0, dTerm = 0;

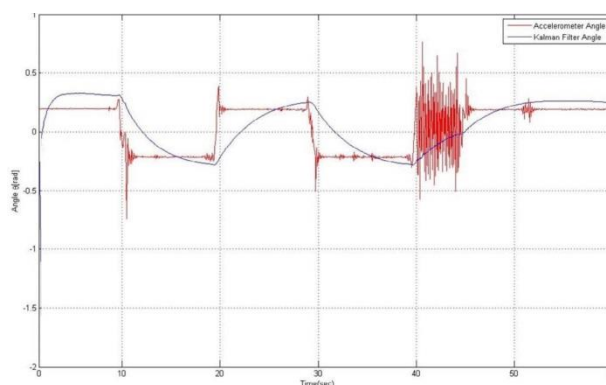
int updatePid(int targetPosition, int
currentPosition) {

int error = targetPosition -
currentPosition;
pTerm = Kp * error;
integrated_error += error;
iTerm = Ki * constrain(integrated_error,
-GUARD_GAIN, GUARD_GAIN);
dTerm = Kd * (error - last_error);
last_error = error;
return -constrain(K*(pTerm + iTerm +
dTerm), -255, 255);
}

```

Nilai  $Q_{\text{accelerometer}}$  dan  $Q_{\text{gyroscope}}$  di setting berdasarkan seberapa besar kesalahan yang mungkin terjadi. Biasanya nilai ini didapat dari percobaan awal. Nilai  $R_{\text{pengukuran}}$  menunjukkan noise yang memungkinkan.

Metode tuning filter yang digunakan dalam penelitian ini adalah trial dan error. Setelah Matrik  $Q_w$  dan  $R_v$  didapat dari hasil percobaan awal, maka nilai tersebut dianggap konstan. Gambar 4 menunjukkan respon keluaran sistem ketika filter dimatikan.



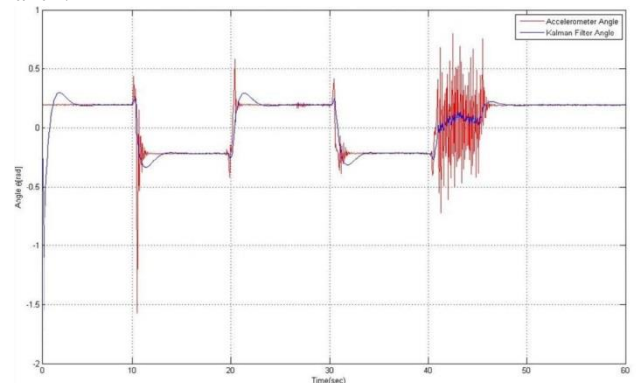
Gambar 4. Respon keluaran sistem ketika filter dimatikan

Gambar 4 dapat dilihat bahwa keluaran sistem tidak stabil.

Respon keluaran filter kalman sangat lambat jika dibandingkan dengan data dari accelerometer. Delay filter kalman yang besar ini menjadi masalah utama ketika dimasukkan pada controller PID. Dalam percobaan awal parameter kovarian dapat diubah-ubah dan kemudian mengamati respon sistem. Terdapat 2 skenario percobaan awal:

1. Matrik kovarian noise proses  $Q_{\text{gyroscope}}$  ditetapkan bernilai lebih rendah dari  $Q_{\text{accelerometer}}$ . Nilai  $Q_{\text{gyroscope}}$  lebih rendah ini berarti dianggap lebih akurat dari pada data accelerometer.
2. Matrik kovarian noise proses  $Q_{\text{accelerometer}}$  ditetapkan bernilai lebih rendah dari  $Q_{\text{gyroscope}}$ . Nilai  $Q_{\text{accelerometer}}$  lebih rendah ini berarti dianggap lebih akurat dari pada data agyroscope.

Dari percobaan awal, ketika filter dalam proses inisialisasi terjadi overshoot. Kurang lebih sekitar 3 detik filter berangsur-angsur stabil. Gambar 5 menunjukkan respon keluaran sistem ketika filter aktif.



Gambar 5. Respon Keluaran Sistem ketika Filter Aktif

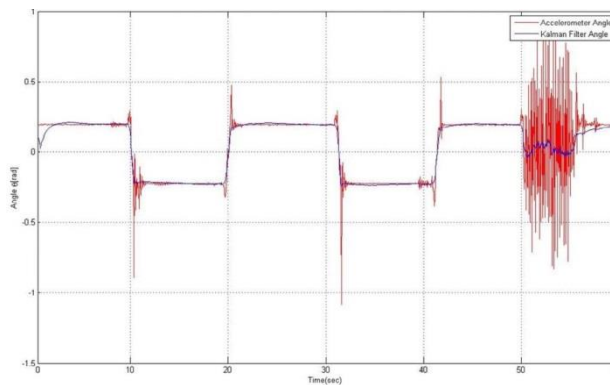
Solusi permasalahan overshoot, dapat diselesaikan dengan menyesuaikan matrik parameter kovarian noise proses  $Q_{\text{gyroscope}}$ .

Dari hasil percobaan nilai matrik kovarian proses optimal pada:

$Q_{\text{accelerometer}}$  : 0.001  
 $Q_{\text{gyroscope}}$  : 0.05

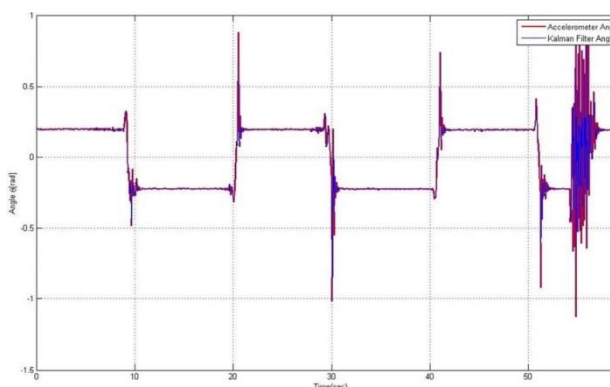
Dengan menentukan matrik kovarian noise proses, respon filter dapat mengurangi atau menghilangkan overshoot. Gambar 6 menunjukkan respon keluaran filter ketika kovarian proses telah ditentukan optimal.





Gambar 6. Respon keluaran filter ketika kovarian proses telah ditentukan optimal

Matrik kovarian noise pengukuran  $R_v$  menunjukkan tingkat keakuratan data pengukuran. Jika nilai  $R_v$  tinggi berarti nilai pengukuran hasil sensor dianggap memiliki noise yang besar. Sedangkan jika  $R_v$  rendah maka dianggap data sensor memiliki noise rendah. Dari hasil percobaan, nilai kovarian noise pengukuran  $R_v$  optimal pada 0.03. Gambar 7 menunjukkan keluaran filter ketika kovarian pengukuran telah ditentukan optimal.



Gambar 7. Respon keluaran filter ketika kovarian pengukuran telah ditentukan optimal

Pendekatan dari sisi kontroler dicapai jika PID dalam bentuk diskrit. Ketika algoritma kontrol PID ditulis dalam bentuk diskrit, implementasi software dari kontroler PID akan sangat mudah. Representasi diskrit controller membuatnya lebih mudah untuk menerapkan algoritma PID di mikrocontroller atau mikroprosesor. Representasi diskrit dari algoritma kontrol PID sebagai berikut:

$$u(k) = K_p \text{error}(k) + K_i \sum_{k=1} \text{error}(k) + K_d(\text{error}(k) - \text{error}(k-1)) \quad (11)$$

Dimana:

$U_k$  adalah input yang tidak diketahui masuk ke proses

$k$  adalah indeks waktu

$K_p, K_i, K_d$  adalah konstanta PID

Tujuan dari controller PID adalah untuk memberikan stabilitas sistem. PID terdiri dari 3

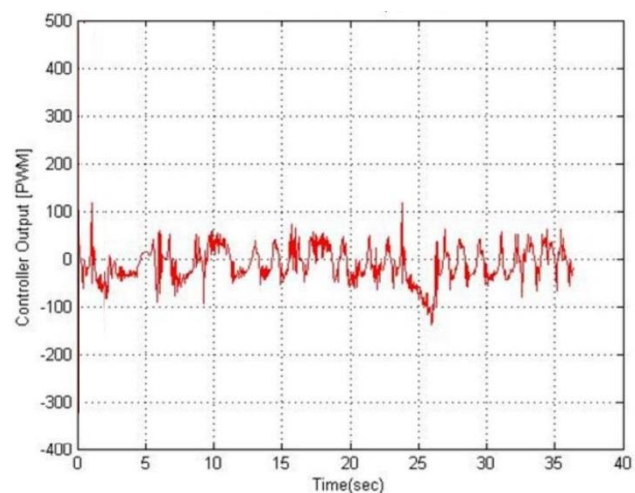
bagian gain yang mempengaruhi respon keluaran sistem.  $K_p$  menentukan rise time sistem.  $K_i$  mempengaruhi error steady state.  $K_d$  mengontrol respon overshoot sistem. Dari hasil percobaan, parameter PID optimal pada:

$$P = 1790.005$$

$$I = 0.129$$

$$D = 96.881$$

Gambar 8 menunjukkan respon keluaran controller PID setelah parameter PID ditentukan optimal.



Gambar 8. Respon keluaran controller PID setelah parameter PID ditentukan optimal

## 5. KESIMPULAN

Sistem telah mengimplementasikan algoritma PID dan EnKF pada robot untuk mengurangi noise. Penentuan filter kovarian membutuhkan tuning secara manual. Hasil pengujian menunjukkan bahwa dibutuhkan trial and error ketika menentukan noise kovarian proses. Overshoot sistem dapat dikurangi dengan mengatur noise covariance matrix proses. Hasil percobaan menunjukkan bahwa sistem optimal pada:

$$Q_{\text{accelerometer}}: 0001$$

$$Q_{\text{gyroscope}}: 0.05$$

$$R_{\text{measurement}}: 0:03$$

$$P = 1790.005$$

$$I = 0.129$$

$$D = 96.881$$

Dengan metode trial and error membutuhkan banyak waktu, sehingga pada penelitian berikutnya sebaiknya digunakan algoritma komputasi cerdas yang dapat menentukan secara akurat  $Q_w$  dan  $R_v$ . Dan diharapkan penelitian lebih lanjut dari sistem kontrol cerdas yang mampu melakukan pencarian otomatis.

## 6. DAFTAR PUSTAKA

- Baehaqi, Estimasi Variabel Keadaan pada Non-Isothermal Continuous Stirred Tank Reaktor Menggunakan Unscented Kalman Filter dan Ensemble Kalman Filter, Tesis Magister, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2009.
- Dharmawan. A, Estimasi posisi robot beroda dua dengan pendulum terbalik menggunakan metode ensemble Kalman Filter, Undergraduate Thesis of Mathematics, RSMA 518.1 Dha e, 2012.
- Geoffrey D. Bennett, Building an Oper-source Segway(TM), University of New South Weles, Australia, 2007.
- Gunterus, F. Falsafah Dasar System Pengendalian Proses. PT Elex Media Komputindo. Jakarta, 1994.
- Hasbullah, H dan Erna Apriliani. Algoritma Adaptive Covariance Rank Unscented Kalman Filter Untuk Estimasi Keadaan Pada Persamaan Air Dangkal. Prosiding Seminar Nasional Penelitian, Pendidikan dan Penerapan MIPA, Fakultas MIPA, Universitas Negeri Yogyakarta, 2011.
- <http://www.inpharmix.com>. A PID Controller For Lego Mindstorms Robots, [http://www.inpharmix.com/jps/PID\\_Controller\\_For\\_Lego\\_Mindstorms\\_Robots.html](http://www.inpharmix.com/jps/PID_Controller_For_Lego_Mindstorms_Robots.html), 2010.
- Hyunuk Ha, Sungmin Ryu, Jangmyung Lee, A Robust control of mobile inverted pendulum using single accelerometer, The Fifteenth International Symposium on Artificial Life and Robotics, 2010.
- J. Johns and J. Mandel, A two-stage ensemble Kalman filter for smooth data assimilation. Environmental and Ecological Statistics, in print. Special issue, Conference on New Developments of Statistical Analysis in Wildlife, Fisheries, and Ecological Research, Oct 13-16, 2004, Columbia, MI. CCM Report 221, University of Colorado at Denver and Health Sciences Center, 2005.
- Kapugu. Y, Analisa Desain Struktur dan Kenyamanan System Suspensi Passive Pada Personal Smart Vehicle 2 Roda, Jurnal Teknik Pomits Vol. 1, No. 1, (2012) 1-3, Surabaya, 2012.
- Khoswanto, H. Purwanto. J, Keseimbangan Robot Beroda Dua Menggunakan Metode Fuzzy Logic. Universitas Kristen Petra Surabaya, 2009.
- Kleinbaurer, R, Kalman Filtering Implementation with Matlab, Study Report of Study Geodesy and Geoinformatics at Universitat Stuttgart, Helsinki University of Technology, Helsinki, 2004.
- Masduki, A. dan Apriliani, E, Estimation of Surabaya River Water Quality Using Kalman Filter Algorithm, The Journal for Technology and Science, Vol. 19, No. 3, hal. 87-91, 2008.
- R.C Ooi, Balancing a Two-Wheeled Autonomous Robot, Retrieved January 18, 2009 from the World Wide <http://robotics.ee.uwa.edu.au/theses/2003-Balance-Ooi.pdf>, 2003.
- Rolf H. Reichle, Jeffrey P. Walker, Randal D. Koster, Paul R. Houser, Extended versus Ensemble Kalman Filter for Land Data Assimilation, Jurnal of Hydrometeorology, Volume:3, 2002.
- Rudi, Estimasi Variabel Keadaan System dengan Model Pengukuran Taklinear Menggunakan Extended Kalman Filter dan Unscented Kalman Filter, Tesis Magister, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya, 2007.